中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 744−752



DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151041

# 不同灌水水平下一膜两年覆盖间作农田耗水特征及经济效益研究*

赵 财[1] 柴 强[1**] 冯福学[1,2] 殷 文[1] 胡发龙[1] 周文斌[1]

(1. 甘肃省干旱生境作物学重点实验室/甘肃农业大学农学院 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学工学院 兰州 730070)

**摘 要** 以河西走廊区主导间作模式玉米||豌豆间作系统为研究对象，在高(7 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$)、中(6 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$)、低(5 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$)3 种灌水水平下，研究了一膜两年覆盖、秋免耕春覆膜和传统耕作覆膜对间作群体耗水量和棵间蒸发的影响，以期为间作种植模式的优化耕作措施、地膜再利用、提高水分利用效率等提供理论依据。结果表明，不同灌水水平对间作群体生育期棵间蒸发量存在显著影响，随灌水水平的提高棵间蒸发量增大；但在相同灌水水平下不同覆膜方式间差异不明显，且互作效应不显著；不同处理豌豆收获前、后，间作农田棵间蒸发在玉米带和豌豆带存在显著差异，不同处理收获前、后豌豆带棵间蒸发量平均值较玉米带分别高 68.51%和 69.30%；豌豆带是造成间作农田系统蒸发耗水大的主要因素，占地 60%的玉米带棵间蒸发量只占农田蒸发总量的 44.47%，而占地仅为 40%的豌豆带蒸发量却占 55.53%；玉米间作豌豆农田棵间蒸发主要发生在豌豆收获以后，豌豆收获前的棵间蒸发仅占总蒸发量的 26.98%。一膜两年覆盖可显著提高单方水效益，不同灌水处理平均值较秋免耕春覆膜和传统耕作覆膜方式分别提高 7.39%和 31.33%，且在中等灌水条件下一膜两年覆盖的单方水效益最高，达 2.51 元·$m^{-3}$。研究结果表明相同灌水水平下一膜两年覆盖玉米带抑制农田棵间蒸发、减少水分无效损失的效果与传统覆膜方式相当；农田棵间蒸发量、耗水结构(E/ET)与灌水水平间呈正相关关系；在中等灌水水平下一膜两年覆盖可获得较高的经济效益。

**关键词** 一膜两年覆盖 玉米||豌豆间作 单方水效益 棵间蒸发量 耗水结构
**中图分类号:** S344.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0744-09

# Characteristics and economic benefits of water consumption in intercropping fields with one plastic film mulching for 2 years and different irrigation levels*

ZHAO Cai[1], CHAI Qiang[1**], FENG Fuxue[1,2], YIN Wen[1], HU Falong[1], ZHOU Wenbin[1]

(1. Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science / Agronomy College, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract** In order to optimize farming practice, plastic film recycling and water use efficiency of intercropping farming systems, a field experiment was conducted on maize-pea intercropping field at Hexi Corridor in Gansu Province. The experiment investigated the effect of three mulching patterns (NT: single plastic mulching for 2 years; CT: no tillage in fall with mulching and tillage in the next spring; CT: traditional mulching and tillage) on crop total water consumption and soil evaporation under high (7 200 $m^3 \cdot hm^{-2}$), intermediate (6 450 $m^3 \cdot hm^{-2}$) and low (5 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$) irrigation levels. The results showed that the level of water supply had a significant effect on the soil evaporation. The soil evaporation increased with increasing irrigation level, but there was no significant difference among different mulching patterns under the same irrigation

* 国家自然科学基金项目(31360323)、国家公益性行业项目(201503125)和国家科技支撑计划项目(2012BAD14B10)资助
** 通讯作者: 柴强，主要研究方向为多熟种植、循环农业和节水农业。E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
赵财，主要从事多熟种植和节水农业研究。E-mail: zhaoc@gsau.edu.cn
收稿日期: 2015−09−23 接受日期: 2016−01−26

* The study was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 31360323), the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (No. 201503125), and the National Key Technology R&D Program of China (2012BAD14B10).
** Corresponding author, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn
Received Sep. 23, 2015; accepted Jan. 26, 2016

level. There was a significant difference in soil evaporation between maize strip and pea strip during harvest period of pea in all the treatments. Soil evaporation in pea strip was 68.51% and 69.30% higher than in maize strip before and after pea harvest, respectively. In addition, pea strip was an important factor driving water consumption in the intercropping farming system. The maize strip, which occupied some 60% of the farmland, only accounted for 44.47% of soil evaporation. Then the pea strip, which occupied some 40% of the farmland accounted for 55.53% of the total soil evaporation. Moreover, the evaporation in maize-pea intercropping field was mainly occurred after pea harvest, as only 26.98% of the soil evaporation occurred before pea harvest. NT treatment significantly increased the benefits of cubic meter water. The mean of water benefit per cubic meter under different irrigation levels were 7.39% and 31.33% higher for NT than for RT and CT, respectively. In addition, the highest water benefit per cubic meter reached 2.51 Yuan·m$^{-3}$, which was observed under NT plus medium irrigation. In conclusion, NT reduced soil evaporation and non-productive water loss common under traditional mulching. Soil evaporation and total water consumption were positive correlated with irrigation level, with the highest water benefit per cubic meter under NT at moderate irrigation.

**Keywords**　Single plastic mulching in 2 years; Maize-pea intercropping; Per cubic meter water benefit; Soil evaporation; Water consumption pattern



农田耗水量由作物生育期的作物体表蒸腾量和农田土壤棵间蒸发量两部分构成，其变化与地表覆盖、土壤温度、土壤水分、作物生长状况和气象条件等密切相关。在作物群体的总耗水量中，农田棵间蒸发占很大比例，而农田棵间蒸发量的降低和控制被认为是提高作物水分利用效率的重要途径[1]。研究表明，优化覆盖方式、种植模式、灌溉技术、灌溉量及灌溉制度可有效减少作物棵间无效蒸发；其中，地膜覆盖具有较好的保墒功能，可有效抑制土壤水分蒸发，使蒸发无效耗水转化为有效水，提高农田水分的有效利用[2−3]。但一方面是农用地膜在自然条件下降解困难，在土壤内可存在 200~400 年，据 2007 年普查结果表明，全国农田地膜残留总量达 12.10 万 t，已直接影响到农业的生产，甚至造成某些作物减产；另一方面，传统的覆膜技术只在作物生育期覆盖，农田休闲期进行翻耕裸露，造成严重的水分无效蒸发和土壤风蚀。而研究表明休闲期覆盖地膜可提高土壤含水量，有利于土壤水库的扩蓄增容，能显著提高作物产量和水分利用效率[4−5]；并且农田少免耕能有效改善土壤水、肥、气、热等作物生长微环境，具有良好的经济效益和生态效益[6−9]。因此，绿洲灌区在地膜减量化使用的同时，如何实现农田地膜覆盖与少免耕技术的有机结合是当前农业现代化进程中亟待解决的一个科学问题。

国内外学者对于间作节水理论[10−11]和保护性耕作研究[12−13]比较深入，但大多独立开展，地膜覆盖研究集中在传统耕作下的地膜覆盖，少免耕农作研究基本集中在秸秆覆盖相结合的少免耕技术。一膜两年用栽培技术是一种农田地膜循环再利用作物生产技术，是将覆膜栽培、地膜高效利用和农田免耕技术有机结合和组装，在玉米(*Zea mays*)、小麦(*Triticum aestivum*)、向日葵(*Helianthus annuus*)、大豆(*Glycine max*)、糜子(*Panicum miliaceum*)、亚麻(*Camelina crantz*)等多种作物上已有相关研究[14−15]。豆科/禾本科间作较单作能够在有限水资源条件下有效提高资源利用率，被认为是未来可持续农业发展的重要方向之一，近年来在河西走廊区得到广泛应用[16−17]。本研究通过对不同灌水水平下一膜两年用玉米间作豌豆农田棵间蒸发的系统研究，阐明一膜两年用间作模式的耗水特征，这将对绿洲灌区集约持续农业的发展具有重要实践和生态意义。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验区概况

本研究在甘肃农业大学绿洲农业科研教学基地(103°5′E，37°30′N)进行。试验区位于河西走廊东端的武威市凉州区黄羊镇，属寒温带干旱气候区，海拔 1 506 m，无霜期约 155 d，多年平均降雨量 156 mm、年蒸发量约 2 400 mm，干燥度 5.85，年平均气温 7.2 ℃，≥0 ℃和≥10 ℃积温分别为 3 513.4 ℃和 2 985.4 ℃；日照时数 2 945 h。土地资源广阔，光照资源丰富，昼夜温差大，适于发展间作套种等多熟种植。试验期间试验区日均气温 17.85 ℃，有效降雨量 216.6 mm，高于多年平均降雨量(图 1)。

### 1.2　试验设计

试验设 3 种覆膜耕作方式：传统耕作覆膜、秋免耕春覆膜和一膜两年覆盖；3 个灌水梯度：灌溉定额 5 700 m$^3$·hm$^{-2}$、6 450 m$^3$·hm$^{-2}$和 7 200 m$^3$·hm$^{-2}$，灌溉制度根据玉米生育时期制定；共 9 个处理，重复 3 次，田间随机排列。不同处理设计和实施方法见表 1，灌溉制度见表 2。

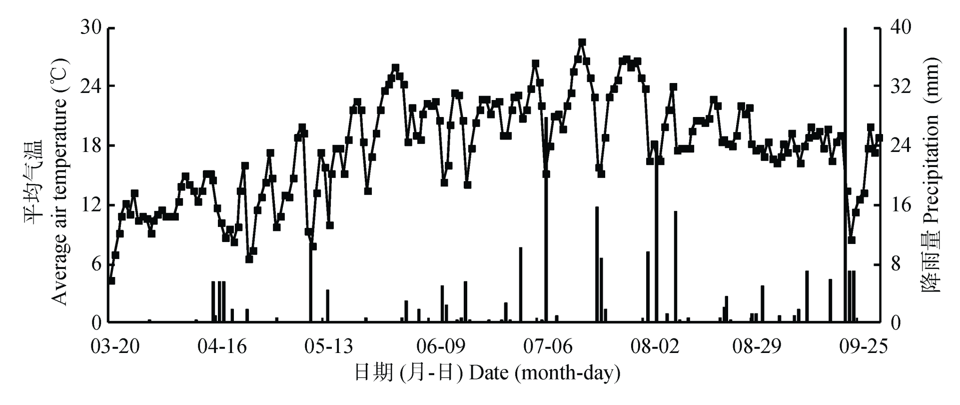



**图 1　作物生育期试验区日均气温及降雨量(2014 年)**

Fig. 1　Precipitation and air temperature during crop growing period at the experiment site in 2014

**表 1　不同覆盖处理设计和实施方法**

Table 1　Experiment design and codes of different mulching treatments

| 覆盖处理 Mulching treatment | 代码 Code | 说明 Description |
|---|---|---|
| 传统耕作覆膜 Conventional mulching and tillage | CT | 2013 年前茬收获后深翻耕, 2014 年春天播前耙磨覆膜 Moldboard plowing after harvest in 2013, harrowing and plastic film mulching in the spring of 2014 |
| 秋免耕春覆膜 No tillage in autumn and mulching in next spring | RT | 2013 年前茬种植收获后免耕, 2014 年播前揭去玉米带旧膜，旋耕覆膜 No-till after harvest in 2013, removing old plastic film and rotary ploughing and new plastic film mulching in the spring of 2014 |
| 一膜两年覆盖 One plastic film mulching for 2 years | NT | 2013 年前茬收获后免耕, 2014 年直接在旧膜上播种玉米 No-till after harvest in 2013, planting with the old plastic film mulching and without tillage in the spring of 2014 |

**表 2　不同灌水水平的灌溉制度**

Table 2　Irrigation regimes of different irrigation treatments　$m^3 \cdot hm^{-2}$

| 灌水处理 Irrigation treatment | 灌水时期 Irrigating stage | | | | | 灌溉定额 Total irrigation |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 冬储灌 Winter irrigation | 拔节期 Jointing | 大喇叭口期 Bell mouthed | 开花期 Flowering | 灌浆期 Filling | |
| $I_1$ | 1 800 | 1 050 | 975 | 975 | 900 | 5 700 |
| $I_2$ | 1 800 | 1 275 | 1 125 | 1 125 | 1 125 | 6 450 |
| $I_3$ | 1 800 | 1 350 | 1 350 | 1 350 | 1 350 | 7 200 |

施肥制度：不同处理的总施氮水平一致，为 300 $kg \cdot hm^{-2}$，基肥施总氮量的 10%；追肥按照玉米生育时期进行，玉米拔节期(六叶期)第 1 次追肥，为总施氮量的 20%；第 2 次大喇叭口期(十叶期)追肥，为总施氮量的 50%；第 3 次于玉米开花后 10 d 追肥，施用对应剩余的氮肥量。磷肥按照 N∶P 为 1∶0.75 比例全部作为基肥施用。

**1.3　田间结构及茬口处理**

**1.3.1　田间结构**

玉米间作豌豆采用带状间作种植，玉米带地膜覆盖，豌豆带不覆膜。玉米带宽 110 cm，种 3 行；豌豆带宽 80 cm，种 4 行。

**1.3.2　茬口处理**

试验于 2013 年和 2014 年进行，其中 2013 年为预备试验，玉米间作豌豆灌水、施肥等田间管理措施保持一致。玉米品种为“先玉 335”，豌豆(*Pisum sativum*)品种为“陇豌 1 号”。豌豆播种日期为 2014 年 4 月 5 日，收获日期为 2014 年 7 月 10 日；玉米播种日期为 2014 年 4 月 25 日，收获日期为 2014 年 10 月 1 日。

按照试验设计，一膜两年覆盖处理和秋免耕春覆膜处理小区在 2013 年玉米收获后免耕，保持地膜的完整度在 70%以上；传统耕作处理为玉米收获后进行残膜回收并深翻耕。2014 年春季，秋免耕春覆膜处理将旧膜揭去后进行旋耕覆膜，传统覆膜处理进行旋耕耙磨后覆膜。试验指标的测定在 2014 年进行。

**1.4　测定指标及计算方法**

**1.4.1　棵间蒸发量**

将自制微型蒸散仪(Micro Lysimeter，采用直径 10 cm 的 PVC 管制成，高度 15 cm，底部用塑料薄膜封堵)放入田间的预埋管中，顶部与地面平齐。玉米

间作豌豆模式中, 在豌豆带、玉米带各安装 1 个自制微型蒸散仪分别测定玉米带和豌豆带的棵间蒸发量, 预埋管装在玉米带和豌豆带的中央位置, 玉米带中预埋管中心距离两边玉米植株分别为 20 cm, 豌豆带中的预埋管距离两边豌豆植株分别为 10 cm (图 2)。用精度为 0.02 g 的 LP3102 型电子天平每天称重以计算土壤棵间蒸发量。微型蒸散仪中土样重量每减少 1 g 相当于蒸发水分 0.105 1 mm。取小区原状土测定, 每 3 d 测定一次, 2~3 d 后更换其中的土, 使其与大田土壤水分一致, 下雨或灌水后加测。本研究中豌豆收获前的计算时间自 4 月 5 日豌豆播种开始到 7 月 10 日豌豆收获, 豌豆收获后的时间为 7 月 10 日开始到 10 月 1 日玉米收获为止。间作群体棵间蒸发量根据两种作物的占地比, 利用加权平均法计算。

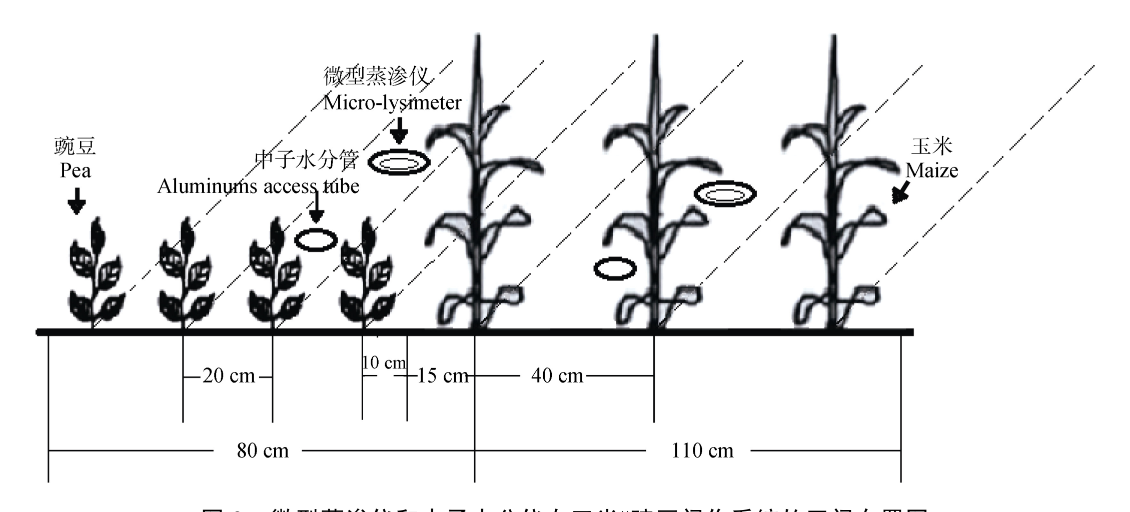



**图 2　微型蒸渗仪和中子水分仪在玉米||豌豆间作系统的田间布置图**

Fig. 2　Field arrangement diagram of micro-lysimeter and neutron moisture gauge in maize||pea intercropping system

**1.4.2　土壤含水量**

土壤含水量使用土钻与中子水分仪测定。每 20 d 测定一次, 播前、收获后、灌水前、灌水后加测, 测定土层深度为 120 cm。测定时, 前 30 cm 用土钻人工取土, 10 cm 为一层。30~120 cm 用水分中子仪(美国 CPN 公司 503DR)测定, 同时在玉米、豌豆两个作物带各设 1 个测定点, 铝管装于带型中央(图 2)。

**1.4.3　作物耗水量(ET)**

耗水量=(播前土壤贮水量−收获后土壤贮水量)+生育期降水量+灌水量(本试验设计的灌水量相对较小, 加之试验期间降水稀少, 故渗漏量可忽略不计; 试验区地下水埋深在 30 m 以下, 因此也未考虑地下上升水的影响)。其公式为:

$$ET=P+I+S1-S2 \tag{1}$$

式中: $P$ 生育期降水量, $I$ 为生育期灌水量, $S1$ 为播种期土壤贮水量, $S2$ 为收获期土壤贮水量。

0~120 cm 土壤贮水量(soil water storage, SWS, mm)使用如下公式进行计算:

$$SWS=10\times h\times a\times\theta \tag{2}$$

式中: $h$ 为土壤深度(cm), $a$ 为土壤容重(g·cm$^{-3}$), $\theta$ 为体积含水量。

**1.4.4　测产**

以试验小区为单位, 单打单收, 自然风干后测定各自产量。

**1.4.5　单方水效益**

$$单方水效益=纯效益/耗水量(ET) \tag{3}$$

$$纯效益=总产值-总投入 \tag{4}$$

农产品(籽粒、秸秆)、生产资料(种子、农药、化肥、地膜、劳力、机械)等价格按当年平均市价计算。

**1.5　数据统计**

试验数据采用 Microsoft EXCEL 2007 进行整理汇总, 用 SPSS 17.0 进行显著性检验(LSD 法)。

## 2　结果与分析

**2.1　一膜两年覆盖对农田棵间蒸发量的影响**

利用加权平均法计算间作农田棵间蒸发量, 不同灌水水平与覆膜条件下玉米间作豌豆群体全生育期总棵间蒸发量如图 3 所示。不同灌水水平对间作群体总棵间蒸发量存在显著影响, 但在相同灌水水平下覆膜方式间差异不明显, 且互作效应不显著。一膜两年覆盖方式(NT)下, 高灌水处理(I3)和中等灌水处理(I2)分别较低灌水处理(I1)的棵间蒸发量高 28.25%和 20.97%, 且高灌水水平与中、低灌水水平间差异显著; 秋免耕春覆膜处理(RT)下, 高灌水处理(I3)较中等灌水处理(I2)和低灌水处理(I1)的棵间蒸发量分别高 27.44%和 38.60%, 且灌水水平间差异

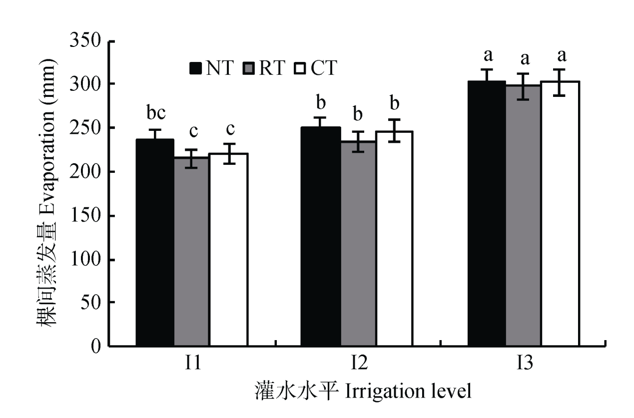



**图 3** 不同灌水及覆膜条件对玉米||豌豆间作群体作物生育期总农田棵间蒸发量的影响

Fig. 3 Effects of different irrigation levels and mulching treatments on total evaporation during whole growth season of maize||pea intercropping system

图中不同小写字母代表处理间达5%显著水平，下同。Different small letters mean significant difference among different treatments at 0. 05 level. The same below.

显著；传统耕作处理(CT)下，3 个灌水水平间存在显著差异，高灌水处理(I3)和中等灌水处理(I2)分别较低灌水处理(I1)的棵间蒸发量高 37.02%和 22.51%。说明一膜两年覆盖和传统耕作覆膜方式对农田棵间蒸发量有相同作用，棵间蒸发量的差异主要由灌水量的不同而造成。

**2.2** 一膜两年覆盖玉米||豌豆间作农田棵间蒸发的时空分布特征

**2.2.1** 豌豆收获前后间作群体不同带内的棵间蒸发量

玉米间作豌豆系统中豌豆收获前农田作物带棵间蒸发总量如图 4 所示。豌豆收获前间作群体棵间蒸发在玉米带和豌豆带存在显著差异，豌豆带在收获前的棵间蒸发量较玉米带高 68.51%。豌豆带的棵间蒸发量尤其是高灌水处理 NTI3、RTI3 和 CTI3 分别达 96.70 mm、95.65 mm 和 95.50 mm，而玉米带高灌水处理 NTI3、RTI3 和 CTI3 的棵间蒸发量分别只为 54.30 mm、57.80 mm 和 57.70 mm，较豌豆带相应处理降低 43.85%、39.57%和 39.58%。豌豆收获前，一膜两年覆盖(NT)间作系统中玉米带农田棵间蒸发量高于秋免耕春覆膜(RT)和传统覆膜方式(CT) 10.91%和 17.84%；同一覆膜方式下，豌豆收获前各带农田棵间蒸发量在不同灌水水平间存在显著差异，玉米带 NTI3 较 NTI2 和 NTI1 分别高 2.55%和 7.10%，RTI3 较 RTI2 和 RTI1 分别高 27.78%和 35.52%，CTI3 较 CTI2 和 CTI1 分别高 34.03%和 72.04%。由此说明，一膜两年覆盖(NT)的玉米带较豌豆带可显著降低农田棵间蒸发量，但棵间蒸发量高于秋免耕春覆膜处理(RT)和传统覆膜处理(CT)，主要原因可能是因为豌豆收获前一膜两年覆盖方式的土壤含水率显著高于秋免耕春覆膜处理和传统覆膜处理；同时得出，灌溉水平越高棵间蒸发量越大，造成水分的无效损失越高。

豌豆收获后间作棵间蒸发的差异如图 5 所示。豌豆收获后农田棵间蒸发量较豌豆收获前显著提高，且豌豆收获后间作群体棵间蒸发在玉米带和豌豆带存在显著差异，豌豆带在收获后的棵间蒸发量较玉米带平均高 69.30%。豌豆带的棵间蒸发量尤其在高灌水处理 NTI3、RTI3 和 CTI3 最高，分别达 312.25 mm、

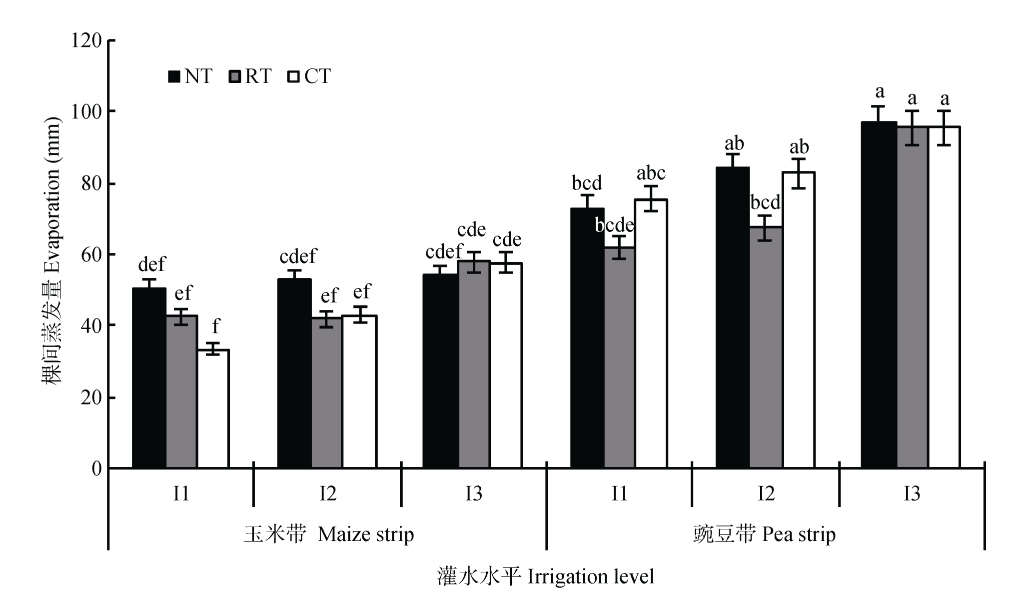



**图 4** 不同灌水及覆膜条件下豌豆收获前玉米||豌豆间作系统不同作物带内棵间蒸发量

Fig. 4 Evaporation at different crop strips of maize||pea intercropping system before pea harvest under different irrigation levels and mulching treatments

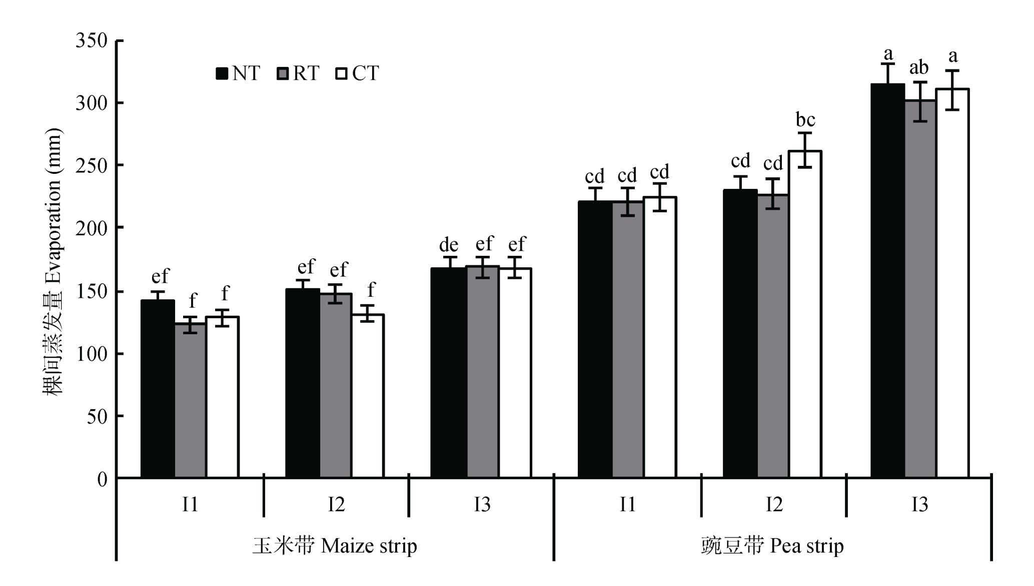



**图 5**　不同灌水及覆膜条件下豌豆收获后玉米||豌豆间作系统不同作物带内棵间蒸发量

Fig. 5　Evaporation at different crop strips of maize||pea intercropping system after pea harvest under different irrigation levels and mulching treatments

301.05 mm 和 310.50 mm，而玉米带高灌水处理NTI3、RTI3 和 CTI3 的棵间蒸发量分别只为 168.25 mm、169.20 mm 和 168.70 mm，分别较豌豆带相应处理降低 46.12%、43.80%和 45.67%。同一灌水水平下，不同覆膜方式间棵间蒸发量无明显差异，3 个灌水水平下的棵间蒸发量平均值一膜两年覆盖处理(NT)为153.95 mm，秋免耕春覆膜处理(RT)为 146.90 mm，传统覆膜处理(CT)为 143.3 mm。由豌豆收获前、后棵间蒸发量说明，豌豆收获后的棵间蒸发量是农田蒸发量的主要部分，而玉米带地膜覆盖可显著降低农田棵间蒸发量，且一膜两年覆盖与传统耕作覆膜方式具有相同的抑制效果。

**2.2.2**　豌豆收获前、后间作群体棵间蒸发总量

豌豆收获前后间作棵间蒸发总量的差异如图 6 所示。玉米间作豌豆群体的棵间蒸发主要发生在豌豆收获以后，豌豆收获前的棵间蒸发仅占总蒸发量的 26.98%。NTI3、NTI2、NTI1、RTI3、RTI2、RTI1、CTI3、CTI2 和 CTI1 处理的棵间蒸发总量豌豆收获

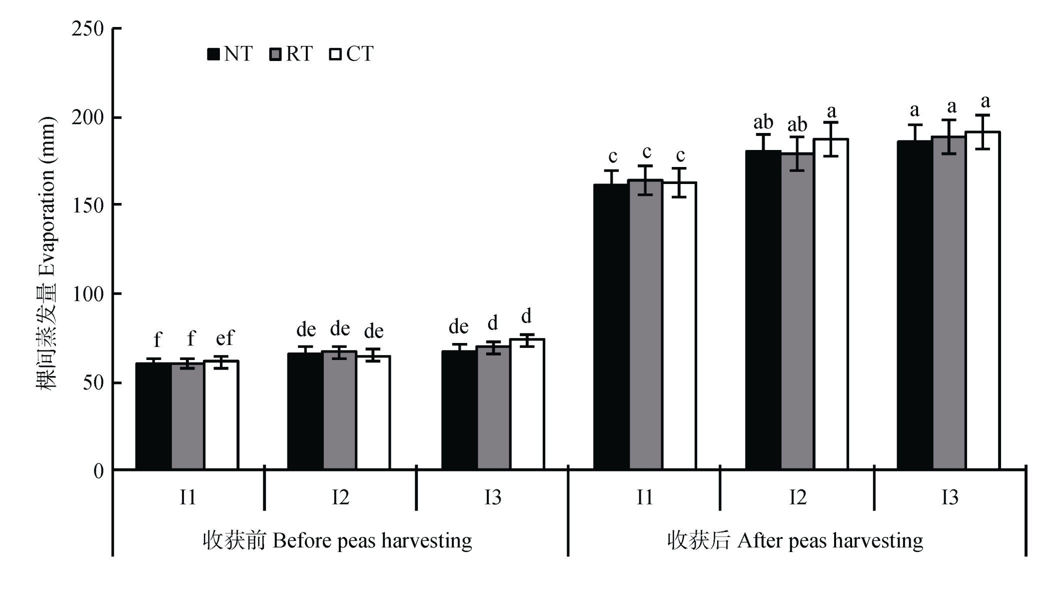



**图 6**　不同灌水及覆膜条件下豌豆收获前后玉米||豌豆间作系统棵间蒸发总量

Fig. 6　Evaporation of maize||pea intercropping system before and after pea harvest under different irrigation levels and mulching treatments

后较收获前增高 174.34%、173.12%、169.82%、169.55%、168.43%、170.51%、159.37%、186.84%和 165.10，增高显著。在相同灌水量水平下，不同覆膜方式在豌豆收获前和收获后对棵间蒸发总量的影响差异不明显。但在同种覆膜条件下，灌水水平对棵间蒸发量的影响显著，豌豆收获前和收获后都是中、高灌水水平的棵间蒸发总量显著高于低灌水水平，说明一膜两年覆盖可起到与传统耕作覆膜方式相同的降低农田棵间蒸发量的效果。

#### 2.2.3 间作带蒸发量占间作群体蒸发总量比例

间作群体中玉米带及豌豆带棵间蒸发量占间作群体农田棵间蒸发总量的比例如图 7 所示。玉米带蒸发量占间作群体蒸发量的比例明显低于豌豆带；高灌水水平下，3 种覆膜处理 NTI3、RTI3 和 CTI3 玉米带棵间蒸发量占总蒸发量的比例为 42.62%、44.03%和 43.40%，而豌豆带所占比例达 57.38%、55.97%和 56.60%；中灌水水平下，3 种覆膜处理 NTI2、RTI2 和 CTI2 玉米带棵间蒸发量占总蒸发量的比例为 47.17%、47.01%和 41.11%，而豌豆带所占比例达 52.83%、52.99%和 58.89%；低灌水水平下，3 种覆膜处理 NTI1、RTI1 和 CTI1 玉米带棵间蒸发量占总蒸发量的比例为 47.56%、44.62%和 42.68%，而豌豆带所占比例达 52.44%、55.38%和 57.32%。通过玉米带与豌豆带棵间蒸发总量与各自所占土地比例的计算得出，占地 60%的玉米带棵间蒸发量只占农田蒸发总量的 44.47%，而占地仅为 40%的豌豆带蒸发量却占 55.53%，说明在间作群体中无地膜覆盖的豌豆带棵间蒸发量占主要比例，且灌水量越大豌豆带因棵间蒸发造成的无效损耗越大。

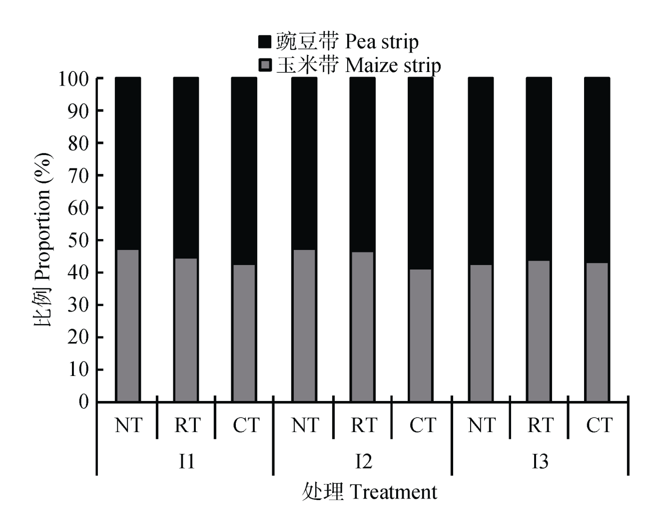



图 7 不同灌水及覆膜条件下玉米||豌豆间作系统不同作物间作带棵间蒸发量占总蒸发量比例

Fig. 7 Proportions of evaporation at maize and pea strips of maize||pea intercropping system under different irrigation levels and mulching treatments

### 2.3 一膜两年覆盖对间作农田耗水结构的影响

作物生产过程中，通过地膜覆盖等农艺技术措施降低棵间蒸发在作物总耗水量中的比例(E/ET)是提高水分利用效率的重要手段。利用加权平均法计算间作农田的耗水量并核算了耗水结构(E/ET)，不同灌水水平与覆膜条件下玉米间作豌豆全生育期耗水结构(E/ET)如图 8 所示。E/ET 在不同覆膜方式间无显著差异。不同灌水水平间 E/ET 值表现为随灌水水平的降低而降低。说明过量灌水使田间蒸发损失增加，适量灌水在保证作物产量的同时可有效降低农田因蒸发而造成的水分无效损失。

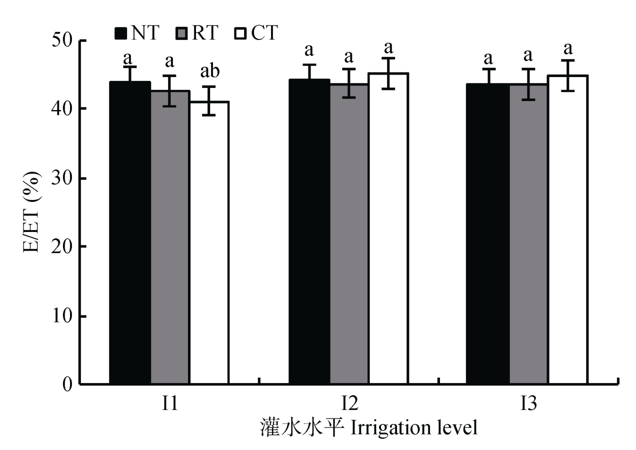



图 8 不同灌水及覆膜条件下玉米||豌豆间作农田耗水结构(E/ET)

Fig. 8 E/ET of maize||pea intercropping system under different irrigation levels and mulching treatments

### 2.4 一膜两年覆盖对作物籽粒产量及单方水效益的影响

如表 3 所示，一膜两年覆盖模式(NT)可有效提高单方水效益，一膜两年覆盖较秋免耕春覆膜(RT)和传统耕作覆膜方式(CT)的单方水效益分别提高 7.39%和 31.33%；同一覆膜方式下，不同灌水处理间有显著差异，中灌水水平(I2)最高，高灌水水平(I3)次之，低灌水水平(I1)最低。一膜两年覆盖方式下中等灌水水平可获得较高的单方水效益，为 2.51 Yuan·m$^{-3}$，NTI2 的单方水效益较 NTI3 和 NTI1 分别高 8.86%和 45.94%，说明一膜两年覆盖玉米间作豌豆农田在适量灌水水平下较传统覆膜方式可降低资源性投入成本，显著提高单方水效益。

## 3 讨论与结论

农田棵间蒸发是田间土壤水分散失的纯物理过程，是农田土壤水分消耗中的无效损耗；农田棵间蒸发量的大小与土壤含水量、太阳辐射、气温及地膜覆盖条件等密切相关。西北绿洲灌区年蒸发量都在年平均降雨量的 15 倍以上，因此，绿洲灌区农田

表 3　不同灌水及覆膜处理的玉米||豌豆间作系统籽粒产量及单方水效益
Table 3　Yield and water benefit of maize||pea intercropping system under different irrigation levels and mulching treatments

| 处理 Treatment | 籽粒产量 Grain yield (kg·hm$^{-2}$) | | 总产值 Total output (Yuan·hm$^{-2}$) | 总投入 Total input (Yuan·hm$^{-2}$) | 纯收益 Net benefit (Yuan·hm$^{-2}$) | 单方水效益 Water benefit (Yuan·m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 豌豆 Pea | 玉米 Maize | | | | |
| NTI3 | 2 161±62a | 13 176±160a | 37 614±560a | 21 022 | 16 592±508a | 2.30±0.05b |
| NTI2 | 2 088±21a | 13 020±225a | 36 977±354ab | 20 797 | 16 180±235a | 2.51±0.08a |
| NTI1 | 1 734±58bc | 10 538±261ab | 30 370±213c | 20 572 | 9 798±73c | 1.72±0.04d |
| RTI3 | 2 142±47a | 13 089±450a | 37 340±451a | 22 260 | 15 080±209ab | 2.09±0.09c |
| RTI2 | 2 084±74a | 12 809±235a | 36 539±501ab | 22 035 | 14 504±485b | 2.25±0.18bc |
| RTI1 | 1 957±47ab | 10 796±194ab | 31 738±215c | 21 810 | 9 928±132c | 1.74±0.11d |
| CTI3 | 2 144±56a | 13 126±204a | 37 535±325a | 23 010 | 14 525±211b | 2.02±0.06cd |
| CTI2 | 2 180±72a | 12 927±284a | 37 019±405a | 22 785 | 14 234±324b | 2.21±0.10bc |
| CTI1 | 1 621±68c | 9 114±350c | 26 874±185d | 22 560 | 4 314±65d | 0.76±0.07e |

表中同列不同小写字母代表处理间差异达 5%显著水平。Different lowercase in the same column mean significant difference at 0. 05 level among different treatments.

节水的关键就是如何通过科学的农业措施最大限度地减少棵间蒸发。地膜覆盖可减少棵间土壤水分蒸发，总体耗水量有所减少[18]。地膜覆盖下不同灌水量对棵间土壤蒸发有一定的影响，随着灌水量的增加，棵间土壤蒸发和蒸散量均有一定增加[19]。本研究表明，玉米间作豌豆种植模式下，农田棵间蒸发量随灌水水平的提高而增加，而与覆膜方式无显著相关性，说明玉米带一膜两年覆盖在抑制水分蒸发方面可以起到与传统耕作覆膜方式相同的效果；豌豆带少免耕耕作对棵间蒸发的影响不明显，无地膜覆盖的豌豆带是造成间作农田系统蒸发耗水大的主要因素，占地 60%的玉米带棵间蒸发量只占农田蒸发总量的 44.47%，而占地仅为 40%的豌豆带蒸发量却占 55.53%。进一步对间作农田豌豆收获前后棵间蒸发量的研究表明，豌豆收获后农田棵间蒸发量较豌豆收获前显著提高，且豌豆收获后间作群体豌豆带棵间蒸发显著高于玉米带，豌豆带的棵间蒸发量较玉米带高 69.30%，这可能是由于豌豆群体前期的遮阴面积小，地表裸露面积大所引起，而对应的玉米带则由于地膜覆盖的作用[20]，有效地阻隔了地表水分与空气间的交换，加之玉米群体生长后期叶面积指数增大，蒸腾作用强，使棵间蒸发作用减弱。由此可见，在玉米带一膜两年覆盖下如何降低无地膜覆盖豌豆带的棵间蒸发将是减少玉米间作豌豆农田总蒸发量的关键所在。胡发龙等[21]的研究表明，在小麦间作玉米群体中用秸秆覆盖小麦带蒸发量降低 5.4%~10.0%，E/ET 相比于无覆盖处理小麦间作玉米群体降低 2.9%~5.2%，可减少水分的无效损失，提高水分利用率；张清涛等[2]的研究也表明，优化种植模式、灌溉方式、灌溉制度及覆盖方式可有效减少作物棵间无效蒸发。因此，玉米间作豌豆模式中玉米带一膜两年覆盖技术和豌豆带秸秆覆盖技术有机结合有进一步减少棵间无效蒸发的可行性，但地膜、秸秆二元覆盖技术在抑制间作农田棵间蒸发，减少农田水分的无效蒸发机理尚需进一步研究。

同时，一膜两年覆盖技术可减少生产投入，显著提高经济效益[22]。本研究中一膜两年覆盖由于减少了机械投入、人工投入和地膜投入，有效地降低了投入成本，显著提高了单方水效益，较秋免耕春覆膜和传统耕作覆膜方式分别提高 7.39%和 31.33%，且在中等灌水条件下一膜两年覆盖的单方水效益最高，达 2.51 元·m$^{-3}$。因此，玉米间作豌豆模式中玉米带一膜两年覆盖技术可作为旱区发展节本高效间作模式的研发重点。

## 参考文献 References

[1] 刘昌明，张喜英，由懋正，等．大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸散的研究[J]．水利学报，1998(10): 36–39
Liu C M, Zhang X Y, You M Z, et al. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large-scale weighing lysimeter and micro lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(10): 36–39
[2] 张清涛，邱国玉，李莉，等．抑制农田土壤蒸发的研究进展[J]．中国生态农业学报, 2006, 14(1): 87–89
Zhang Q T, Qiu G Y, Li L, et al. Advances in the inhibition of soil evaporation in farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(1): 87–89
[3] 翟治芬，赵元忠，景明，等．秸秆和地膜覆盖下春玉米农田腾发特征研究[J]．中国生态农业学报, 2010, 18(1): 62–66
Zhai Z F, Zhao Y Z, Jing M, et al. Evapotranspiration characteristics of spring maize under film and straw mulch[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 62–66
[4] 张军钱．旱地全膜双垄沟播玉米适宜覆膜时间研究[J]．水土保持通报, 2009, 29(4): 220–223

Zhang J Q. Best covering time of whole plastic-film mulching in corn planting with double ridges and furrows on dryland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(4): 220–223

[5] 杨海迪, 海江波, 贾志宽, 等. 不同地膜周年覆盖对冬小麦土壤水分及利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 27–34
Yang H D, Hai J B, Jia Z K, et al. Effect of different plastic-film mulching in the whole growth period on soil moisture and water use efficiency of winter wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 27–34

[6] 黄有总, 徐世宏, 江立庚. 玉米免耕机理研究进展[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(12): 115–118
Huang Y Z, Xu S H, Jiang L G. Research progress in no-tillage mechanism of maize[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2011, 39(12): 115–118

[7] 李玲玲, 黄高宝, 张仁陟, 等. 不同保护性耕作措施对旱作农田土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2326–2332
Li L L, Huang G B, Zhang R Z, et al. Effects of conservation tillage on soil water regimes in rainfed areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(9): 2326–2332

[8] 黄高宝, 李玲玲, 张仁陟, 等. 免耕秸秆覆盖对旱作麦田土壤温度的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(5): 1–4
Huang G B, Li L L, Zhang R Z, et al. Effects of no-tillage with stubble retention on soil temperature of rainfed spring wheat field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(5): 1–4

[9] 巩杰, 黄高宝, 李延梅, 等. 少免耕耕作法的农田效应[J]. 耕作与栽培, 2002(4): 13–14
Gong J, Huang G B, Li Y M, et al. Field ecological effect of no-tillage[J]. Tillage and Cultivation, 2002(4): 13–14

[10] Gao Y, Duan A W, Sun J S, et al. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1/2): 65–73

[11] Yang C H, Huang G B, Chai Q, et al. Water use and yield of wheat/maize intercropping under alternate irrigation in the oasis field of Northwest China[J]. Field Crops Research, 2011, 124(3): 426–432

[12] Iijima M, Asai T, Zegada-Lizarazu W, et al. Productivity and water source of intercropped wheat and rice in a direct-sown sequential cropping system: The effects of no-tillage and drought[J]. Plant Production Science, 2005, 8(4): 368–374

[13] Fan Z L, Chai Q, Huang G B, et al. Yield and water consumption characteristics of wheat/maize intercropping with reduced tillage in an Oasis region[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 45: 52–58

[14] 王小红. 全膜覆土穴播一膜两年用冬小麦抗旱增产效果试验[J]. 甘肃农业科技, 2014(3): 19–20
Wang X H. Effect test of yield increase and drought resistance of one film be twice used to winter wheat of hold sowing covering soil mulched with film[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2014(3): 19–20

[15] 吴兵, 高玉红, 谢亚萍, 等. 种植密度对一膜两年用胡麻灌浆速率、水分利用效率及产量的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(12): 1912–1919
Wu B, Gao Y H, Xie Y P, et al. Effects of planting density on filling rate, water use efficiency and yield for one film used two years of oil flax[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2013, 27(12): 1912–1919

[16] 史中欣, 柴强, 杨彩虹, 等. 带型配置及施氮量对玉米间作豌豆产量和水分利用效率的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 39–43
Shi Z X, Chai Q, Yang C H, et al. Effects of different nitrogen applications and intercropping stripe compound on yield and WUE under maize/pea intercropping[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(1): 39–43

[17] 陈国栋, 柴强. 根系分隔和供水水平对玉米间作豌豆产量和耗水特征的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 25–30
Chen G D, Chai Q. Effects of root separation and irrigation on yields and water use characteristics of maize pea intercropping systems[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22(12): 25–30

[18] 樊向阳, 齐学斌, 郎旭东, 等. 不同覆盖条件下春玉米田耗水特征及提高水分利用率研究[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 60–64
Fan X Y, Qi X B, Lang X D, et al. A study on characteristics of water consumption and ways of raising water use efficiency for spring maize under different mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(2): 60–64

[19] 于爱忠. 供水与地膜覆盖对玉米农田土壤水热特征及水分利用效率的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013: 2–3
Yu A Z. Effects of plastic mulching and irrigation on soil thermal characteristics and WUE of corn[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013: 2–3

[20] 景明, 姜丙州, 张会敏, 等. 不同覆盖材料对干旱区春小麦棵间蒸发的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(2): 92–95
Jing M, Jiang B Z, Zhang H M, et al. Effect of different mulching materials to soil evaporation of spring wheat in aid region[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(2): 92–95

[21] 胡发龙, 柴强, 殷文. 少耕秸秆覆盖对小麦间作玉米棵间蒸发的影响研究[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(6): 754–757
Hu F L, Chai Q, Yin W. Effect of stubble mulching and reduced tillage on soil evaporation in wheat-maize intercropping[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(6): 754–757

[22] 张雷, 牛建彪, 张成荣, 等. 旱地玉米双垄全膜覆盖“一膜用两年”免耕栽培模式研究[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(2): 8–11
Zhang L, Niu J B, Zhang C R, et al. Study on corn no-till planting mode of double ridge mulching “one film used for two years” on dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(2): 8–11